

УДК 621.324.57

Качан Ю.Г., Дьяченко В.В.

**О ФОРМИРОВАНИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ
ЦЕХОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Потери электрической энергии в системе электроснабжения промышленных предприятий обусловлены многими причинами, такими как низкий коэффициент мощности, ухудшение качества электроэнергии, нерациональность технологического процесса, несовершенство системы, а также причинами организационного характера и др. [1]. Устранение этих причин (внедрение энергосберегающих мероприятий) условно можно разделить на два вида их реализации: в условиях эксплуатации и на стадии проектирования. Выявление причин нерационального электропотребления, на наш взгляд, необходимо начинать с рассмотрения задач проектирования систем электроснабжения, решения которых определяют ее структуру и состав элементов. Естественно, что только система с оптимальными параметрами с точки зрения энергоэффективности обеспечит минимальное электропотребление.

В условиях эксплуатации для внедрения технических энергосберегающих мероприятий, состав которых необходимо определить и обосновать, в начале требуется оценить резервы экономии электроэнергии при ее передаче по конкретной системе электроснабжения. Принцип оценки их будет основан на поиске оптимальной структуры системы и состава ее элементов с точки зрения минимума потерь электрической энергии. Использование этого критерия обусловлено необходимостью оценить предельные значения резервов экономии электрической энергии (потенциал энергосбережения в системах электроснабжения) с последующим определением соответствующих им параметров и структуры системы [2]. В результате основной повышения энергоэффективности систем электроснабжения промышленных предприятий может стать совокупность параметров, реальные значения которых не соответствуют полученным в результате рассмотренной оптимизации. Последующая ранжировка этих параметров по затратности их реализации и даст эффективную последовательность мероприятий по энергосбережению.

Таким образом, для осуществления поставленной задачи необходимо разработать математическую модель, описывающую потери электрической энергии в системе с учетом обуславливающих их параметров. Поиск оптимальных решений на основе такой модели позволит исключить основной недостаток сложившейся практики проектирования, основывающейся, как правило, на технико-экономическом сравнении вариантов, подбор которых предопределен опытом и квалификацией проектировщиков.

Известные методы решения задач в области электроснабжения, например, определение места расположения источника питания [3], выбор числа и номинальных мощностей трансформаторов цеховых трансформаторных подстанций (ТП) [4], выбор мощности компенсирующих устройств [5], формирование схем питающей и распределительной цеховых сетей [6,7] и др., разработаны как самостоятельные, т.е. без учета их взаимосвязей друг с другом. Анализ решения таких задач показал, что исключение указанных взаимосвязей не позволяет в целом найти оптимальное решение, так как решение каждой из них является исходным условием другой (причем возможно и не одной задачи).

Так, например, на уровне системы электроснабжения цеха (цеховые электрические сети), выбрать номинальную мощность трансформатора возможно, если известна

электрическая нагрузка, подключаемая к нему (задача распределения электрической нагрузки по узлам сети); распределение нагрузки осуществляется, если определено количество и место расположения источников питания (например, ТП); в свою очередь, место расположения источника питания может быть выбрано, если известен список нагрузок, подключаемых к нему. Не исключена также и связь источника питания, например, с распределительной подстанцией, к которой он подключен. Очевидно, что решение этих задач будет обусловлено вопросами компенсации реактивной мощности, так как существуют различные способы подключения ее источников (от индивидуального до централизованного на стороне низкого и высокого напряжения), что, естественно, окажет влияние на значения электрических нагрузок в сети, а, следовательно, и на ее показатели.

Таким образом, разрабатываемая модель электрической сети промышленного предприятия должна содержать в явном виде все ее параметры, подлежащие оптимизации, и позволять вычислить их значения. В результате и будет обеспечена оптимальность сети в целом. Однако, в условиях существующих структур служб эксплуатации электрических сетей предприятий и меньшей затратности чисто организационных мероприятий по энергосбережению, пока что имеет смысл выполнить декомпозицию системы на подсистемы, например: внутризаводская сеть, цеховая сеть, источники питания предприятия др., и уже тогда говорить о получении оптимальных параметров для каждого уровня в отдельности. Такая декомпозиция позволит реализовать энергосберегающие мероприятия в каждом подразделении эксплуатации сетей промышленного предприятия. Для получения же оптимальных параметров в целом для всей системы необходимо будет решить другую задачу оптимизации на обобщенной модели, что станет уже отдельным вопросом.

Рассмотрим построение математической модели цеховой электрической сети, оптимизация которой и даст энергоэффективную схему, обеспечивающую передачу и распределение электрической энергии по распределительным узлам сети до 1000 В с минимальными потерями активной электроэнергии. Для выявления оптимизируемых параметров в такой модели представим зависимости этих потерь в элементах цеховой сети. Будем рассматривать следующие элементы: проводники питающих участков сети цеха выше 1000 В (например, кабельные линии 10 кВ), трансформаторы цеховых ТП, проводники распределительных участков сети до 1000 В. Группа рассматриваемых элементов условно может быть разделена на три фрагмента цеховой сети с соответствующими потерями активной электроэнергии в них (за какой-то расчетный период, например, год), сумма которых определит потери в цеховой сети в целом (W , кВт·час/год), а именно:

$$W = W_{PC} + W_T + W_{PC}, \quad (1)$$

где W_{PC} – суммарные потери активной электроэнергии распределительных участков сети до 1000 В; W_T – суммарные потери активной электроэнергии в трансформаторах цеховых ТП; W_{PC} – суммарные потери активной электроэнергии питающих участков сети цеха выше 1000 В.

Пусть для некоторого цеха имеется совокупность i -ых распределительных узлов количеством N (в это число входит все, что должно быть запитано от трансформаторов j -ой ТП, например, мощные единичные электроприемники, которые невозможно подключить к распределительным узлам, троллеи и др.). Далее они представлены как пункты распределительные ($ПР_i$, $i = \overline{1, N}$) с расчетными нагрузками по активной (P_i , кВт) и реактивной (Q_i , кВАр) мощностям и координатами мест расположения в плане цеха ((x_i, y_i) , м). Область размещения j -ых ТП ($j = \overline{1, M}$) и k -ых распределительных подстанций (РП), являющихся допустимыми источниками питания для ТП количеством K ,

описана площадью прямоугольника со сторонами А и В. Для каждой k-ой РП ($k = \overline{1, K}$) заданы координаты их размещения $((x_k, y_k), m)$, а также значения токов короткого замыкания на шинах распределительного устройства РП, обуславливающие величины термически стойких к ним сечений питающих участков сети ($s_k, \text{мм}^2$).

Годовые потери активной энергии в распределительной сети при питании i-ого ПР от j-ой ТП вычисляются как сумма потерь на ij-ом участке ($w_{ij}, \text{кВт}\cdot\text{час}/\text{год}$):

$$W_{PC} = \sum_j^M \sum_i^N w_{ij} = \sum_j^M \sum_i^N w_i l_{ij}, \quad (2)$$

где М – количество трансформаторных подстанций; w_i – удельный параметр потерь ij-ого участка сети на 1 км длины, обусловленный токовой нагрузкой i-ого узла сети (I_i, A) и удельным сопротивлением участка r_{ij} ($\text{Ом}/\text{км}$), при годовом числе часов максимума потерь ($\tau_i, \text{ч}$):

$$w_i = 3 \cdot I_i^2 \cdot r_{ij} \cdot \tau_i \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Токовая нагрузка i-ого узла сети при номинальном напряжении сети ($U_{NPC}, \text{кВ}$) вычисляется как:

$$I_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} / (\sqrt{3} \cdot U_{NPC}). \quad (4)$$

Удельное сопротивление участка сети определяется сечением проводника ij-ого участка ($s_{ij}, \text{мм}^2$) и удельной проводимостью материала его жилы ($\gamma_{ij}, \text{м}/\text{Ом}\cdot\text{мм}^2$):

$$r_{ij} = 1000 / (\gamma_{ij} \cdot s_{ij}). \quad (5)$$

В формуле (2) длина участка сети ($l_{ij}, \text{км}$) может быть вычислена по координатам j-ой ТП (x_j, y_j) и i-ых ПР (x_i, y_i), либо по принципу кратчайшего расстояния:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} / 1000, \quad (6)$$

либо с учетом реального плана прохождения электрических сетей, т.е. корректировкой длины участка соответственно трассе прокладки сети.

Годовые потери активной электроэнергии в трансформаторах цеховых ТП при установке на j-ой ТП трансформатора, соответствующего t-ому типоразмеру, вычисляются как сумма потерь в каждом трансформаторе ($w_{jt}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$):

$$W_T = \sum_j^M w_{jt}. \quad (7)$$

Значения последних обусловлены загрузкой трансформатора и его техническими характеристиками:

$$w_{jt} = P_{x_{jt}} \cdot T_{Bj} + P_{k_{jt}} \cdot k_{z_{jt}}^2 \cdot \tau_j, \quad (8)$$

где $P_{x_{jt}}$ – потери мощности трансформатора j-ой ТП, затрачиваемые на нагревание стали трансформатора t-ого исполнения, кВт; T_{Bj} – число часов включения j-ой ТП, ч; $P_{k_{jt}}$ – номинальные потери мощности в обмотках трансформатора j-ой ТП t-ого исполнения, кВт; τ_j – число часов максимума потерь j-ой ТП, ч; $k_{z_{jt}}$ – коэффициент загрузки трансформатора:

$$k_{z_{jt}} = S_j / S_{\text{ном}t}, \quad (9)$$

где S_j – электрическая нагрузка по полной мощности j -ой ТП, обусловленная перечнем ПР, подключаемых к ней; $S_{номjt}$ – номинальная мощность трансформатора j -ой ТП t -ого исполнения, кВА.

Годовые потери активной энергии в питающей сети при питании j -ой ТП от k -ой РП вычисляются как сумма потерь на jk -ом участке (w_{jk} , кВт·час/год), и формулы их вычисления аналогичны формулам (2)–(6) с тем отличием, что рассматриваются выше-лежащие участки сети, обеспечивающие питание j -ой ТП, и определяются как:

$$W_{пс} = \sum_k^K \sum_j^M w_{jk} = \sum_k^K \sum_j^M w_j l_{jk}. \quad (10)$$

Удельный параметр потерь jk -ого участка сети на 1 км длины (w_j) здесь будет зависеть от токовой нагрузки jk -ого участка, который в свою очередь определяется токовой электрической нагрузкой j -ой ТП (I_j , А) при номинальном напряжении питающей сети ($U_{пс}$, кВ):

$$I_j = S_j / (\sqrt{3} \cdot U_{пс}) = \sqrt{P_j^2 + Q_j^2} / (\sqrt{3} \cdot U_{пс}), \quad (11)$$

а также удельным сопротивлением участка сети, зависит от сечения проводника jk -ого участка (s_{jk} , мм²) и удельной проводимости материала его жилы (γ_{jk} , м/ом·мм²):

$$r_{jk} = 1000 / (\gamma_{jk} \cdot s_{jk}). \quad (12)$$

Принцип определения длин (l_{jk} , км) участков питающей сети аналогичен распределительной, например:

$$l_{jk} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} / 1000. \quad (13)$$

Подставляя в формулу (1) зависимости (2), (7), (10) и заменив в них вышеопи-санные составляющие, получим общую формулу вычисления суммарных потерь активной электроэнергии в цеховой сети:

$$\begin{aligned} W = & \sum_j^M \sum_i^N w_i l_{ij} + \sum_j^M w_{jt} + \sum_k^K \sum_j^M w_j l_{jk} = \\ & + \sum_j^M \sum_i^N \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{пс}^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{ij} \cdot s_{ij}} \cdot \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \cdot \tau_i \right) \cdot 10^{-3} + \\ & + \sum_j^M (P_{x_{jt}} \cdot T_{Bj} + P_{K_{jt}} \cdot \frac{P_j^2 + Q_j^2}{S_{номjt}^2} \cdot \tau_j) + \\ & + \sum_k^K \sum_j^M \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_{пс}^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{jk} \cdot s_{jk}} \cdot \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \cdot \tau_j \right) \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (14)$$

Воспользуемся описанной в литературе логикой построения математической модели формирования оптимальных схем [7,8], изменив при этом целевую функцию на потери активной электроэнергии в сети и введя в формулу (14) дополнительные пере-менные X_{ij} , X_{jk} , T_{ij} . Первые две из них отражают распределение электрических нагрузок (в виде некоторого перечня групп ПР_и, ТП_j при радиальной схеме их подключения) по источникам питания (ТП_j, РП_к соответственно), последняя – выбор номинальной мощ-

ности трансформатора j -ой ТП t -ого исполнения с соответствующими техническими характеристиками ($S_{номt}$, P_{xt} , P_{kt}). Для учета вопроса компенсации реактивной мощности введем также переменную Q_{kj} , значение которой отражает генерируемую компенсирующими устройствами (КУ) в сеть номинальную реактивную мощность при подключении их к шинам распределительного устройства низкого напряжения j -ой ТП. Тогда задача формирования оптимальной схемы цеховой электрической сети с точки зрения энергосбережения примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} W = & \sum_j^M \sum_i^N \left(\left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{нпс}^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{ij} \cdot S_{ij}} \cdot \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \cdot \tau_i \right) \cdot 10^{-3} \right) \cdot X_{ij} + \\ & + \sum_t^T \sum_j^M \left(\left(P_{x_{jt}} \cdot T_{vj} + P_{k_{jt}} \cdot \frac{P_j^2 + (Q_j - Q_{kj})^2}{S_{номjt}^2} \cdot \tau_j \right) \right) \cdot T_{tj} + \\ & + \sum_k^K \sum_j^M \left(\left(\frac{P_j^2 + (Q_j - Q_{kj})^2}{U_{нпс}^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{jk} \cdot S_{jk}} \cdot \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \cdot \tau_j \right) \cdot 10^{-3} \right) \cdot X_{jk} \rightarrow \min \end{aligned} \right. \quad (15)$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_j^M X_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, N}, \quad (16)$$

$$\sum_k^K X_{jk} = 1, \quad j = \overline{1, M}, \quad (17)$$

$$\sum_t^T T_{tj} = 1, \quad j = \overline{1, M}, \quad (18)$$

$$\sqrt{\sum_i^N (P_i \cdot X_{ij})^2 + \sum_i^N (Q_i \cdot X_{ij})^2} \leq \beta \cdot \sum_t^T (P_j^2 + (Q_j - Q_{kj})^2) \cdot T_{tj}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (19)$$

где X_{ij} – булева переменная, характеризующая связь i -ого ПР с j -ой ТП, и принимает значение равное единице, если связь имеется, и нулю при отсутствии таковой (ограничение (16)); X_{jk} – булева переменная, отражающая связи j -ой ТП с k -ой РП, принимает значения равные либо единице, либо нулю, в зависимости от наличия или отсутствия связей между ними (ограничение (17)); T_{tj} – булева переменная, которая характеризует установку трансформатора на j -ой ТП некоторой номинальной мощности $S_{номt}$, равная при этом единице, и нулю – при отсутствии трансформатора (ограничение (18)); T – количество номенклатурных исполнений трансформаторов, допустимых к рассмотрению по условиям их реализации для конкретного предприятия.

Условие (19) описывает предельное допустимое значение нагрузки трансформатора, что отражается коэффициентом его загрузки β , причем для однитрансформаторной подстанции его можно принять равным единице или 0,65, 0,7 – для ТП с двумя трансформаторами, соответственно с воздушной и масляной системой охлаждения.

Для получения оптимальных решений с помощью указанной модели, необходимо преобразовать ее в алгоритмическую структуру (что вызвано организацией вычислений), состоящую из отдельных блоков расчета следующих переменных: x_1 – количество ТП (M , шт.); x_2 – место расположение ТП в плане цеха ((x_j, y_j) , м); x_3 – распределение i -ых ПР по j -ой ТП (X_{ij} , которая отражает список ПР подключаемых к ТП), x_4 – номинальная мощность j -ой ТП ($S_{номjt}$, кВА), x_5 – распределение j -ой ТП по РП (X_{jk} , опи-

связи между ТП и РП); x_6 – номинальные мощности компенсирующих устройств, подключаемые к j -ой ТП ($Q_{куj}$, кВАр); x_7 – сечения передающих элементов jk -ых питающих участков сети (S_{jk} , мм²). Преобразованная таким образом модель:

$$W=f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \rightarrow \min \quad (20)$$

будет иметь при фиксированных переменных (x_1, x_2, x_6, x_7) единый оптимизируемый модуль (см. формулу (15)), позволяющий вычислить переменные x_3, x_4, x_5 . Процедура изменения переменных x_1, x_2, x_6, x_7 выполняется по определенному правилу, а диапазон варьирования ограничивается топологическими и энергетическими характеристиками цеха.

Результаты решения, основанные на модели (20), могут быть получены с использованием методов комбинаторной оптимизации в сочетании с эвристическими алгоритмами отдельных задач электроснабжения. Для практического использования вышеописанной модели (получение параметров энергоэффективной схемы цеховой сети) была разработана ее компьютерная реализация на языке C++ в виде инженерного приложения WindowsKTP.bpr. с использованием программного приложения Microsoft Excel, позволяющего совмещать и выполнять работу с другими расчетно-аналитическими программами.

Литература

1. Анчарова Т.В., Гамазин С.И., Шевченко В.В. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях. – М.: Высш. шк., 1990. – 143 с.
2. Качан Ю.Г., Дьяченко В.В. Об оценке потенциала энергосбережения в системах электроснабжения промышленных предприятий // Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – №2. – С. 154–156.
3. Федоров А.А., Ристхейн Э.М. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1981. – 360 с.
4. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т.3. Кн.2. Использование электроэнергии / Под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 560 с.
5. Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.
6. Тюханов Ю.М. Математическая модель задачи группировки электроприемников по силовым пунктам // Промышленная энергетика, 1980. – №9. – С. 21–22.
7. Тюханов Ю.М., Мац В.В. Автоматизация проектирования при распределении нагрузок по трансформаторным подстанциям. – Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок, 1978. – № 4. – С. 3–5.
8. Веников В.А., Глазунов А.А., Тюханов Ю.М. Математические модели формирования оптимальных схем электроснабжения при автоматизированном проектировании // Электричество, 1983. – №1. – С. 17–22.

Качан Ю.Г., Дьяченко В.В.

ПРО ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СХЕМИ ЦЕХОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

У статті запропонована методика формування енергоефективної схеми цехової електричної мережі, як елемент стратегії енергозбереження на промислових підприємствах. Методика базується на математичній моделі, що враховує взаємозв'язок основних параметрів цехової мережі, що обумовлюють значення втрат активної електроенергії в мережі.